

УДК 621.771.078

А. И. Луговик, С. П. Куделин, Ю. В. Инатович, А. Р. Бондин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ ПО КРИТЕРИЯМ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

### Аннотация

*Сортпрокатное производство является сложным, многосторонним процессом, характеризующимся большими затратами топлива и электроэнергии. Поэтому повышение эффективности производства с учетом минимальных затрат на энергоресурсы является одной из ключевых задач. Применение экспертных систем (ЭС), разработанных на основе современных информационных технологий, использующих элементы искусственного интеллекта, и комплексных математических моделей расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки; созданных на основе современных представлений о механике деформируемого тела, предоставляет возможность быстрого решения этой задачи.*

**Ключевые слова:** экспертные системы, сортовая прокатка, прокатное производство, оптимальные технологические режимы, решение технологических задач.

### Abstract

*Sort-rolled production is a complex, multi-faceted process characterized by high fuel and electricity costs. Therefore, increasing the efficiency of production and minimizing energy costs is one of the key tasks. The use of expert systems (ES), developed on the basis of modern information technologies of artificial intelligence elements and created on the basis of modern concepts of the mechanics of a deformable body of multiple mathematical models for roll pass design and technologies of rolling, provides the quick solution of this problem.*

**Key words:** expert system, rolling manufacture, hot section rolling, optimum rolling-mill practice, costs for fuel and electricity, solution of technological tasks.

Себестоимость проката на непрерывных мелкосортных станах достаточно высокая, что связано, прежде всего, с дорогим топливом и электроэнергией. Поэтому повышение эффективности производства сортового проката на мелкосортных станах в направлении увеличения объемов выпускаемой продукции, экономии энергетических и материальных затрат является весьма актуальной технической задачей [1, 2].

При оптимизации технологических процессов прокатки возможно применение математического аппарата исследования операций в соответствии с изложенной ниже методикой [3-6].

В качестве целевых функций при оптимизации режима прокатки каждого  $j$ -го профилирующего размера могут быть приняты:

– максимум прироста производительности

$$\Delta P_j \rightarrow \max ; \quad (1)$$

– минимум суммарных затрат на топливо и электроэнергию, составляющих часть расходов по переделу:

$$W_j = W_{Tj}C_T + W_{эj}C_э \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $W_T$  и  $W_э$  – расход топлива и электроэнергии на 1 т годного проката;  $C_T$  и  $C_э$  – стоимость топлива и электроэнергии.

Выбирая параметры управления, необходимо учитывать, что производительность непрерывного стана определяется конечной скоростью прокатки  $U_k$ , а расход топлива и электроэнергии зависит от температуры нагрева заготовки  $t_0$  и конечной скорости прокатки. Понижение температуры нагрева заготовки всегда приводит к уменьшению расхода топлива и увеличению расхода электроэнергии на прокатку. Однако из-за значительного превышения  $C_T$  над  $C_э$  целевая функция монотонно убывает и достигает своего минимального значения при уменьшении  $t_0$ . Влияние же скорости прокатки на расход электроэнергии неоднозначно: с одной стороны, увеличение  $U_k$  приводит к повышению температуры раската, а, следовательно, к уменьшению сопротивления деформации и расхода электроэнергии; с другой стороны, вследствие повышения скорости деформации происходит увеличение сопротивления деформации, что приводит к росту расхода электроэнергии. Таким образом, в качестве параметров управления оптимизируемой системы целесообразно принимать как конечную скорость прокатки  $U_k$ , так и температуру нагрева заготовки  $t_0$ .

Поиск экстремума целевых функций удобно проводить методом упорядоченного перебора параметров управления от начального возможного значения с заданным шагом в направлении движения к экстремуму при следующих ограничениях режима прокатки в каждом проходе  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

– по прочности оборудования рабочих клеток

$$R_i < P_{допi}, \quad M_{при} < M_{допi}; \quad (3)$$

– по степени загрузки электродвигателей привода клеток

$$k_{двi} = (M_i / M_{двi}) < 1 \text{ или } N_{при} < N_{двi}; \quad (4)$$

– по скоростному режиму работы стана

$$U_{\min i} < U_i < U_{\max i}; \quad (5)$$

– по условиям захвата и устойчивости раскатов

$$\alpha_i < [\alpha], \quad [a]_{\min} < a_1 < [a]_{\max}; \quad (6)$$

– по производительности нагревательной печи

$$\Pi_j < \Pi_{\pi}, \quad (7)$$

где  $R_i$  и  $M_{при}$  – реакция силы прокатки на шейку вала и крутящий момент прокатки и их допустимые значения  $P_{допi}$  и  $M_{допi}$ ;  $k_{двi}$  – коэффициент загрузки электродвигателя привода клетки;  $M_i$ ,  $M_{двi}$  – крутящий момент, приведенный к валу двигателя, и момент, развиваемый электродвигателем;  $N_{при}$  и  $N_{двi}$  – мощность

прокатки и мощность электродвигателя;  $U_{\min i}$ ,  $U_i$  и  $U_{\max i}$  – расчетная, минимально и максимально допустимая скорость прокатки;  $\alpha_i$ ,  $[\alpha]$  – расчетный и максимально допустимый угол захвата металла валками;  $a_i$ ,  $[a]_{\min}$  и  $[a]_{\max}$  – расчетное, минимально и максимально допустимое по устойчивости отношение осей раскатов неравноосных поперечных сечений;  $\Pi_j$  и  $\Pi_{\Pi}$  – производительность стана при прокатке  $j$ -го профилеразмера и производительность нагревательной печи.

Для моделирования технологических параметров прокатки при различных значениях  $U_k$  и  $t_0$  весьма эффективно применение экспертной системы (ЭС) автоматизированного анализа, проектирования и оптимизации технологических процессов сортовой прокатки. ЭС «Технология сортовой прокатки» [7, 8] позволяет решать достаточно широкий круг задач моделирования, диагностики, оптимизации действующих и проектирования новых технологических процессов прокатки сортовых профилей. Она предоставляет возможность рассчитывать полный комплекс технологических параметров прокатки заданного профиля и проводить их экспертную оценку; определять влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры и нагруженность оборудования стана; моделировать влияние скоростного режима прокатки на изменение технологических параметров и условия работы прокатных клетей; определять параметры силовой загрузки оборудования и возможность прокатки заданной марки стали в условиях действующей калибровки валков; находить причины поломок оборудования рабочих клетей; проектировать оптимальные технологические процессы по критериям быстродействия (производительности) прокатного стана и экономии материально-энергетических ресурсов. ЭС позволяет определять состояние оптимизируемого процесса для различных систем калибров с учетом описанной выше системы ограничений.

Математическая модель ЭС, характеризующая состояние оптимизируемого процесса на каждом шаге (в каждом  $i$ -ом проходе), использует систему расчетов формоизменения металла и энергосиловых параметров прокатки [9], которая позволяет определять суммарный расход энергии в целевой функции (2) по формуле:

$$W_{эj} = (1 / G) \sum_{i=1}^n 71,225 M_{\text{пр}i} / \omega_i D_{ki}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}, \quad (8)$$

где  $G$  – масса одной заготовки, т;  $\omega_i$  – площадь поперечного сечения раската,  $\text{мм}^2$ ;  $D_{ki}$  – катающий диаметр валков, м;  $M_{\text{пр}i}$  – крутящий момент прокатки,  $\text{кН} \cdot \text{м}$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – номер прохода.

Величина  $M_{\text{пр}i}$  рассчитывается в каждом проходе в зависимости от температурных, скоростных и деформационных параметров прокатки

$$M_{\text{пр}i} = M_{\text{пр}} \left( t_i, U_i, \frac{1}{\eta_i}, \lambda_i, A_i, a_{0i}, a_{ki}, \psi \right), \quad (9)$$

где  $t_i$  и  $U_i$  – температура раската и скорость прокатки в каждом проходе;  $\frac{1}{\eta_i}$  и  $\lambda_i$  – коэффициенты обжатия и вытяжки раската;  $A_i$  – приведенный диаметр валков;  $a_{0i}$

– отношение осей полосы перед проходом;  $a_{ki}$  – отношение осей калибра;  $\psi$  – показатель контактного трения в очаге деформации [9].

Расход топлива на нагрев заготовки до требуемой температуры  $t_0$  в методических печах обычно определяют с учетом коэффициента полезного действия печи  $\eta$  и теплотворной способности природного газа  $q$ , принимаемой 8000 ккал/м<sup>3</sup> (33,5 МДж/м<sup>3</sup>)

$$W_{Tj} = cG(t_0 - t_n) / q\eta, \quad (10)$$

где  $c$  – теплоемкость металла;  $t_n$  – температура посяда металла в печь.

Описанная методика была применена для оптимизации технологических режимов прокатки на непрерывном однокоточном мелкопортно – проволочном стане [10-12].

Моделировали процессы прокатки круглой стали диаметром от 10 до 40 мм, угловой равнополочной стали от № 2,5 до № 5, катанки и круглой стали диаметром от 5,5 до 13,8 мм в проволочном блоке клетей из углеродистых марок стали, а также арматурных периодических профилей от № 10 до № 40 из стали марок 25Г2С и 35ГС по действующим калибровкам валков и режимам обжатий.

Режимы прокатки этих профилей регламентировали нагрев непрерывнолитой заготовки квадратного поперечного сечения со стороной 125 мм до температуры  $t_0 = 1220 \div 1180$  °С и прокатку с заданной конечной скоростью.

Перебор параметров управления начинали с указанных значений  $t_0$  в меньшую сторону с шагом 20÷50 °С, а  $U_k$  – в большую сторону с шагом 0,5 м/с.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты моделирования, и оптимизации температурно-скоростного режима прокатки круглой стали диаметром 16 мм марки Ст3, которую прокатывают за 18 проходов. Готовый профиль выдают из чистой клетки стана №20. Применяют две схемы прокатки: первая с пропуском клетей №13 и №14 (промежуточной группы), вторая – с пропуском клетей №17 и №18 (чистой группы). Моделировали режим прокатки профиля по обеим схемам с регламентированной конечной скоростью  $U_k = 16$  м/с и температурой нагрева заготовки  $t_0 = 1180$  °С. При регламентированном режиме прокатки вся система ограничений (3) – (7) выполняется. Наиболее загружен электродвигатель чистой клетки стана, но величина коэффициента его загрузки  $\kappa_{дв}$  не превышает 0,7 (70 %) (рис. 1).

На рис. 2 показан характер изменения скорости прокатки по клетям стана. Видно, что при прокатке с пропуском клетей №17 и №18 максимально возможная конечная скорость прокатки ограничена скоростью срабатывания летучих ножниц №52: 9,5 м/с в то время как скорость выдачи раската из клетки №14 при  $U_k = 16$  м/с равна 9,0 м/с. В случае прокатки с пропуском клетей №13 и №14 максимально возможная конечная скорость прокатки может быть повышена до 18 м/с (см. рис. 2, кривая 4), а температура нагрева исходной заготовки понижена с 1180 °С до 1100 °С. При этом, как видно из рис. 3, разница в температурах раската уменьшается от 80 °С в начале прокатки до 25÷30 °С в конце прокатки вследствие снижения потерь тепла

раскатом излучением и возрастанием прироста тепла в результате скоростного упрочнения металла, связанного с увеличением скорости прокатки. При оптимальных значениях  $U_k^* = 18 \text{ м/с}$  и  $t_0^* = 1100^\circ\text{C}$  все технологические параметры находятся в допустимых пределах и не лимитируют режима прокатки. Основным ограничением конечной скорости прокатки является  $K_{\text{дв}}$  чистовой клетки стана, который в этом случае достигает величины 0,9 (90 %) (см. рис. 1).



Рис. 1. Коэффициенты загрузки электродвигателей главных приводов при прокатке круглой стали Ø16 мм



Рис. 2. Скоростные режимы прокатки круглой стали Ø16 мм

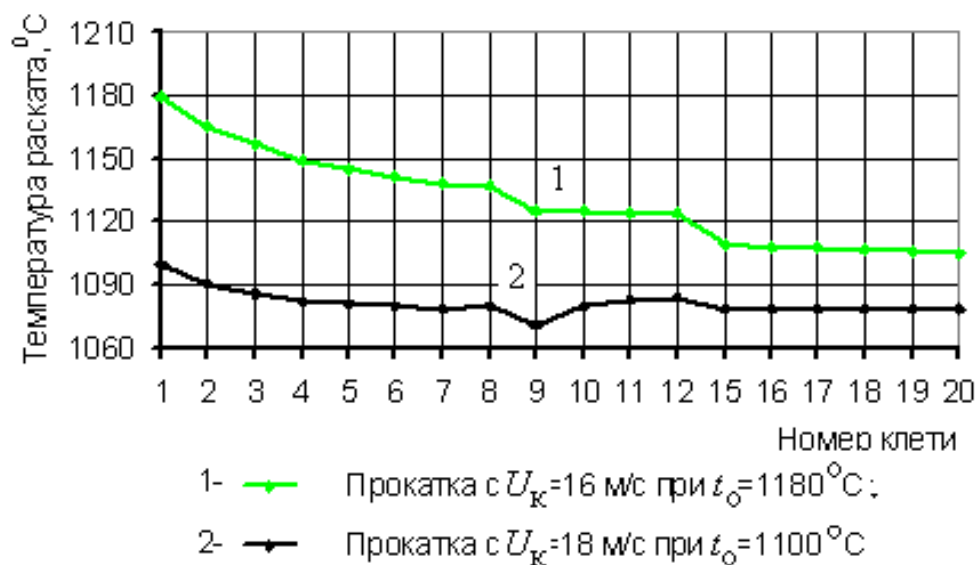


Рис. 3. Температурные режимы прокатки круглой стали Ø16 мм

Производительность стана при прокатке круглой стали Ø16 мм с  $U_k^* = 18$  м/с вместо 16 м/с возрастет на 12,5 % и составит 83,12 т/ч.

В результате аналогичных расчетов установлено, что действующие конечные скорости прокатки круглой, арматурной, угловой стали и катанки могут быть увеличены в зависимости от прокатываемого профиля на 5–30 %. Основными ограничениями (в зависимости от профиляразмера) являются мощность электродвигателей привода рабочих клеток чистовой группы стана, скорость срабатывания летучих ножниц, пропускная способность хвостовой части стана и производительность нагревательной печи, равная 105 т/ч.

Реализация новых скоростных режимов прокатки позволила увеличить среднюю часовую производительность стана с 63,25 до 72,07 т, т.е. на 14 %.

Оптимизация температуры нагрева исходной заготовки показала, что при прокатке круглой, угловой стали и катанки температура нагрева заготовки может быть снижена с регламентированной 1180÷1220 °C до 1100÷1150 °C, а при прокатке арматурной стали до 1150 °C. Это позволяет получить суммарную экономию затрат на топливо и электроэнергию в пределах 1,2–2,1 %, при одновременном увеличении производительности нагревательной печи.

Таким образом, применение методов исследования операций, современной экспертной системы процесса сортовой прокатки и информационных технологий позволило определить оптимальные технологические режимы по критерию экономии энергоресурсов.

### Список использованных источников

1. Мировой рынок проката и перспективы развития сортопрокатного производства в России / Р.С. Тахаутдинов, О.В. Федонин, В.Г. Пугачев [и др.] // Производство проката. 2008. №5. С. 22-27.

2. Радюкевич Л.В. Состояние и основные направления развития прокатного производства черной металлургии России в 2007–2010 гг. // Сталь. 2011. №1. С. 42-47.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
4. Вагнер Г. Основы исследования операций: пер. с англ. – М.: Мир, Т1. 1972. 366с.; Т2. 1973. 488с. Т3. 1973. – 501 с.
5. Гемитерн В.И., Каган Б.М. Методы оптимального проектирования. – М.: Энергия, 1980. – 159 с.
6. Оптимизация прокатного производства / А.Н. Скороходов, П.И. Полухин, Б.М. Илюкович [и др.]. – М.: Металлургия, 1983. – 432 с.
7. Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» / С.П. Куделин, В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович // Свидетельство №2001610602 от 25.05.2001. М.: РАСПАТЕНТ, 2001.
8. Шилов В.А., Куделин С.П., Инатович Ю.В., Бондин А.Р. Экспертная система технологии сортовой прокатки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 9. С. 710-715.
9. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургия, 2010. – 490 с.
10. Внедрение оптимальных технологических режимов прокатки сортовых профилей на стане 320/150 ОАО «АМУРМЕТАЛЛ» / С.А. Хохлов, В.В. Лиманкин, Г.П. Перунов, Ю.В. Инатович // Сталь. 2010. № 12. С. 38-40.
11. Перунов Г.П., Лиманкин В.В., Волков К.В. Освоение технологии прокатки-разделения арматурной стали на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» // Производство прокатка. 2006. №10. С. 16-19.

УДК 656.225

**А. И. Луговик, С. П. Куделин**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ОСНОВНЫХ ЦЕХОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА**

### **Аннотация**

*В статье приводится описание планирования расписания и движения поездов основных цехов металлургического комбината. Кратко описываются принципы планирования движения поездов, архитектура системы и источник данных для нее. Применение данной системы на производстве позволит обеспечить бесперебойное и ритмичное обслуживание производственных агрегатов и цехов, связанное с транспортной системой предприятия.*

**Ключевые слова:** расписание, транспорт, контактный график, информационная система, основные цеха, металлургический комбинат, планирование.